

Úprava malého zážehového motoru pro provoz na alkoholová paliva

ADAPTATION OF SMALL SPARK IGNITION ENGINE TO ALCOHOL FUELS

Martin Pechout, Miroslav Trnka, Martin Novotný – Technická univerzita v Liberci
Michal Vojtíšek – České vysoké učení technické v Praze

Tento článek podává informace o výsledcích použití alkoholových paliv, konkrétně směsi benzinu a dvou alkoholů – n-buthanolu a ethanolu – v malém spalovacím motoru bez úprav a s úpravami pro použití těchto paliv. Sledovány byly základní výkonové parametry, změny teploty výfukových plynů a produkce znečišťujících látek a vliv použití alkoholových paliv v neupraveném a upraveném motoru.

V současné době jsou – v souvislosti s konečnými zásobami ropných paliv, energetickou bezpečností a obavami ze změn klimatu vyvolaných produkcí skleníkových plynů – diskutována různá paliva jako možná náhrada současných paliv v dopravě. Spolu s tím vyvstávají také otázky, zda je možné tato paliva použít i v ostatních typech spalovacích motorů, které jsou používány mimo odvětví dopravy.

Do této kategorie spadají i drobné spalovací motory pohánějící různou drobnou zahradní mechanizaci jako například sekačky, křovinořezy, motorové pily, odfukovače listů apod. V souvislosti se snižováním produkce znečišťujících látek těmito motory narůstá podíl čtyřtákních motorů s odděleným mazáním, v důsledku čehož je zjednodušeno použití alternativních kapalných paliv.

Konkrétně pro zážehové motory, spalující ve své konvenční variantě benzin, je v obecné rovině, kromě poměrně zavedené směsi benzinu s 85 % obj. ethanolu, diskutována řada alkoholových paliv. Pro jejich úspěšné použití musí tato paliva přirozeně splňovat řadu kritérií. Z důvodu použití jednoduchých technologií tvorby směsi (zpravidla jednoduchý karburátor), je u paliv pro tyto motory vhodné použít paliva s vlastnostmi co nejbližšími vlastnostem původního paliva.

Tab. I. porovnává vlastnosti benzinu, čistého ethanolu a příp. dalšího vhodného alkoholového paliva – n-buthanolu (1). Z tabulky vyplývá, že řada pro spalování důležitých vlastností buthanolu vykazuje, v porovnání s etanolem, znatelně nižší odchylky od vlastností benzinu. Jedná se zejména o objemovou výhřevnost (palivo je odměřováno objemově), teoretickou spotřebu vzduchu pro spálení jednotkového množství paliva a oktanového čísla. Jiné vlastnosti však vykazují výrazné odchylky, zejména viskozita n-buthanolu je vyšší.

Použití ethanolu jakožto paliva je dále zatíženo negativními průvodními jevy, konkrétně vázáním atmosférické vlhkosti (hygroskopicitou) a agresivitou vůči pryžovým dílům (7, 8).

Dřívější experimenty s malými neupravenými motory ukazují značný pokles produkce oxidu uhelnatého a citelný pokles produkce nespálených uhlovodíků oproti významnému nárůstu produkce oxidů dusíku v důsledku ochuzení palivové směsi při použití ethanolu (9). Vhodnou úpravou lze docílit shodné bohatosti směsi, a tím omezit nárůst produkce oxidů dusíku při zachování určitého snížení produkce nespálených uhlovodíků, malého zlepšení původních výkonových charakteristik a celkové účinnosti motoru (10). Výsledky jiných autorů ukazují na jen velmi malé změny v průběhu hoření při použití směsného paliva s obsahem buthanolu (11). Rovněž další výsledky ukazují na použitelnost ethanolu a zejména buthanolu jako směsného paliva v malém dvoutákním motoru (12).

Popis experimentů

K experimentům byl použit jednoválcový, čtyřtákní, vzduchem chlazený motor Honda GX-31 určený k pohonu

Tab. I. Porovnání vlastností použitých paliv (1, 2)

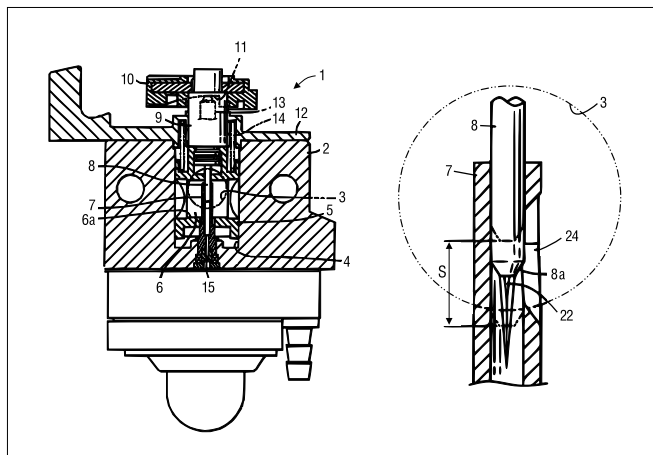
Parametr	Benzin	N-buthanol	Ethanol
Oktanové číslo – výzkumná metoda (RON)	95	94 (3, 4) až 96 (5) *	110
Hustota (kg.m ⁻³)	753 **	810	790
Výhřevnost (MJ.kg ⁻¹)	42,9	33,0	26,8
Objemová výhřevnost (MJ.dm ⁻³)	32,3	26,7	21,2
Skupenské teplo varu (kJ.kg ⁻¹)	380–500	716 (6)	904
Chemický vzorec	směs uhlovodíků	C ₄ H ₉ OH	C ₂ H ₅ OH
Hmotnostní podíl uhlíku (%)	86	65	52
Hmotnostní podíl vodíku (%)	14	13,5	13
Hmotnostní podíl kyslíku (%)	0 **	21,5	35
Viskozita (mm ² .s ⁻¹)	0,4–0,8	3,6	1,5
Rozpustnost vody při 25 °C (%)	<0,01	9,1	100
Teplota varu (°C)	199 (FBP) ***	118	78
Teoretická spotřeba vzduchu (–)	14,7	11,2	9,0

* Rozdíl mezi oktanovým číslem stanoveným výzkumnou a motorovou metodou, jehož hodnota je 80 (3), je v porovnání s benzinem vyšší.

** Hodnota udávaná dodavatelem.

*** FBP – teplota konce destilační křivky 199 °C (hodnota udávaná dodavatelem).

Obr. 1. Řez použitým karburátorem (13)



křovinořezů. Tvorba směsi je u tohoto motoru zajištěna membránovým karburátorem dle patentu firmy Walbro, jehož uspořádání je vyobrazeno na obr. 1. Tento karburátor se vyznačuje několika zajímavými konstrukčními řešeními. Prvním z nich je absence běžné škrticí klapky, kterou nahrazuje otočné šoupátko (pozice 5). Odměřování dávky paliva je realizováno změnou zdvihu jehly karburátoru, čímž se mění odkrytý průtočný průřez ve vedení jehly. Tento motor byl umístěn na brzdovém stanovišti pro testování malých motorů, kde byl provozován v ustálených režimech za vybraných otáček a zatížení.

Nejprve byl motor provozován bez jakýchkoliv úprav na směsi obsahující 0, 15, 30, 50 a 85 % obj. n-buthanolu ve směsi s benzinem a čistý buthanol. Tyto směsi jsou v dalším textu uvozovány Bu s číslicí reprezentující procentuální obsah n-buthanolu. Vyšetřovány byly nejprve změny vnější otáčkové charakteristiky, tedy maximálního dostupného točivého momentu v závislosti na otáčkách motoru. Následně byl motor provozován při polovičním a tříčtvrtinovém točivém momentu vzhledem k maximálnímu dostupnému momentu při použití benzínu a rovněž při maximálním dostupném točivém momentu na jednotlivá paliva, a to při 5000, 6000, 7000 a 8000 ot.min⁻¹.

Při těchto experimentech byly vyhodnocovány koncentrace sledovaných plynných znečišťujících látek přímo ve výfukových plynech. Pro detekci nespálených uhlovodíků byl použit plamen-
no-ionizační detektor (FID, Hartmann & Braun, Německo), oxid uhelnatý byl zjišťován nedispersním infračerveným analyzátozem (NDIR, Horiba, Japonsko) a koncentrace oxidů dusíku byla zjišťována pomocí senzoru pracujícího na principu chemiluminescence (CLA, Horiba, Japonsko).

Dále byla sledována velikostní spektra pevných částic, měřených velikostním klasifikátorem pevných částic TSI EEPs 3090. Při jejich vyhodnocení bylo využito ředicího tunelu s konstantním průtokem, kdy byly výfukové plyny přiváděny do ředicího tunelu a smíšeny s ředicím vzduchem za konstantního průtoku směsi. Část takto naředěného vzorku byla přivedena do klasifikátoru pevných částic.

Následně bylo přikročeno k úpravě karburátoru, spočívající ve výměně škrticí trysky palivového okruhu (pozice 15 na obr. 1.) s výchozím průměrem 0,42 mm, za trysky s průměry 0,44–0,52 mm, odstupňovanými po 0,02 mm. Testovány byly dva režimy při 6000 ot.min⁻¹, a to chod naprázdno a provoz při maximálním dostupném točivém momentu. Vyšetřován byl provoz při použití benzínu, čistého buthanolu a E85.

Výfukové plyny byly nasávány s výrazným přebytkem vzduchu pomocí vysokoobjemového vzorkovače vzduchu Ecotech 3000 s průtokem 60 m³.h⁻¹. Koncentrace sledovaných plynných znečišťujících látek pak byly zjišťovány pomocí přenosného nedispersního infračerveného analyzátoru BAR-97 (14, 15). Toto uspořádání, analogické k ředicímu tunelu s konstantním průtokem (CVS – Constant Volume Sampler), umožňuje ze změřené koncentrace sledované složky a známého průtoku naředěného vzorku určit tok této složky.

Prýžkové díly byly dále vystaveny působení několika paliv, konkrétně čistého benzínu, čistého buthanolu a E85.

Výsledky a diskuze

Porovnání vnějších otáčkových charakteristik u motoru bez úprav karburátoru

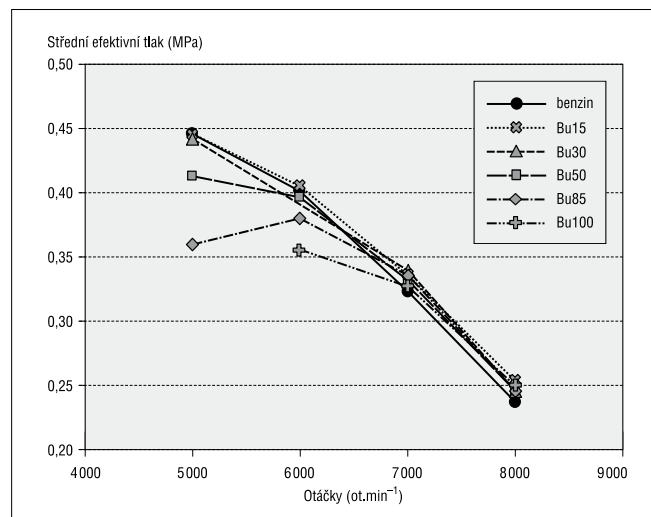
Nejprve byly porovnány výkonnostní charakteristiky neupraveného motoru při provozu na směsná paliva obsahující n-buthanol. Změny jsou reprezentovány na obr. 2. formou vnějších otáčkových charakteristik, tedy funkcí maximálních dostupných točivých momentů pro jednotlivé otáčky.

Z výsledků vyplývá citelný pokles točivého momentu při otáčkách z dolní poloviny provozních otáček. To je způsobeno zejména výrazným ochuzením směsi, které vede ke snížení množství uvolněného tepla. Výraznější pokles nastává při nižších otáčkách, a tedy při nižším podtlaku v difuzoru karburátoru. Při nejnižších vyšetřovaných otáčkách dokonce docházelo při provozu na čistý buthanol k vynechávání zažehnutí směsi, k nestabilnímu chodu motoru bez možnosti vyšetření dostupného točivého momentu.

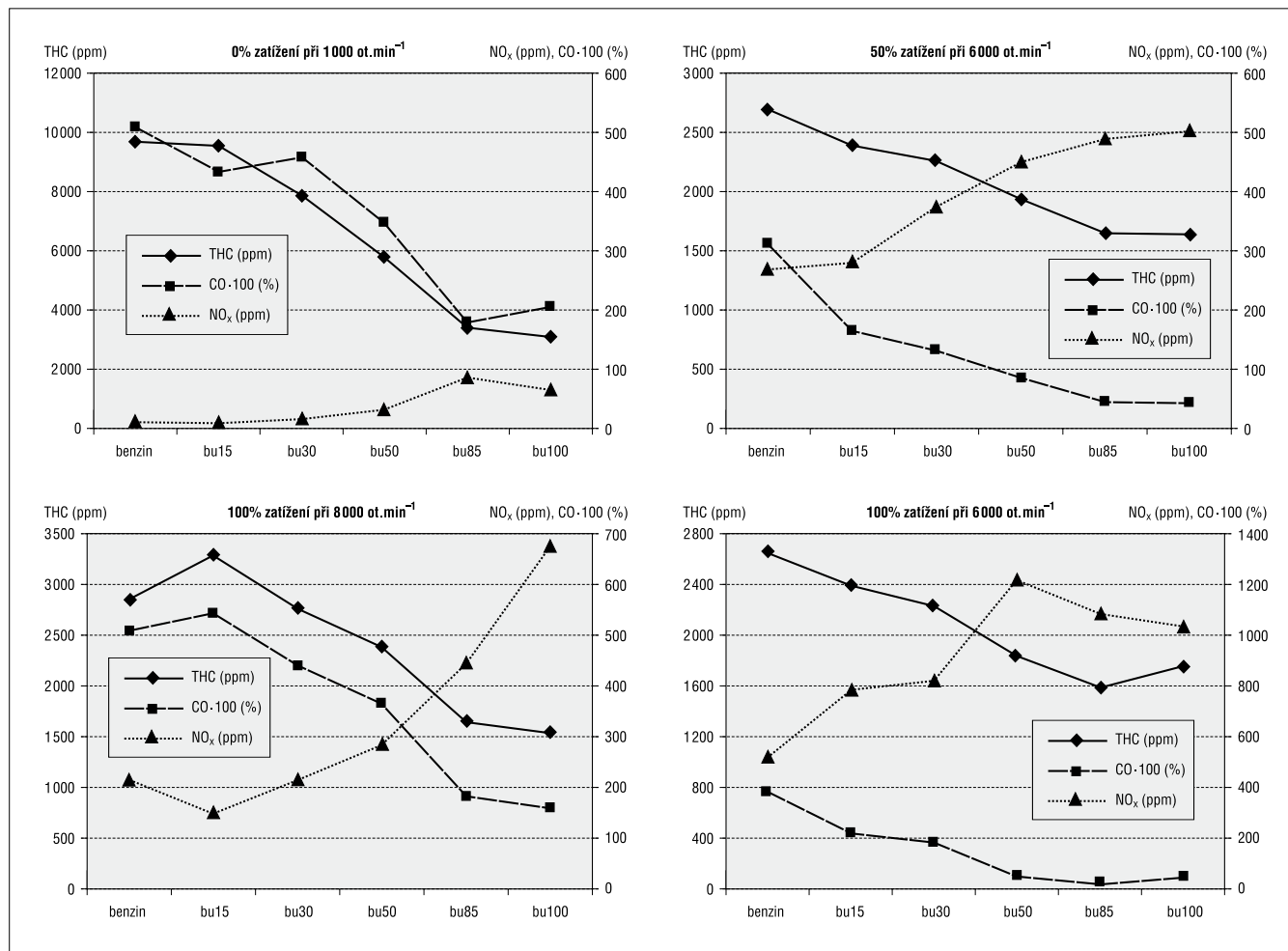
Plynné emise u motoru bez úprav karburátoru

Na obr. 3. jsou uvedeny změny koncentrací plynných znečišťujících látek v surových výfukových plynech. Z těchto průběhů je patrný výrazný pokles látek spojených s nedokonalým spalováním (oxid uhelnatý CO a nespálené uhlovodíky THC) a nárůst produkce oxidů dusíku (NO_x).

Obr. 2. Porovnání vnějších otáčkových charakteristik motoru bez úpravy karburátoru

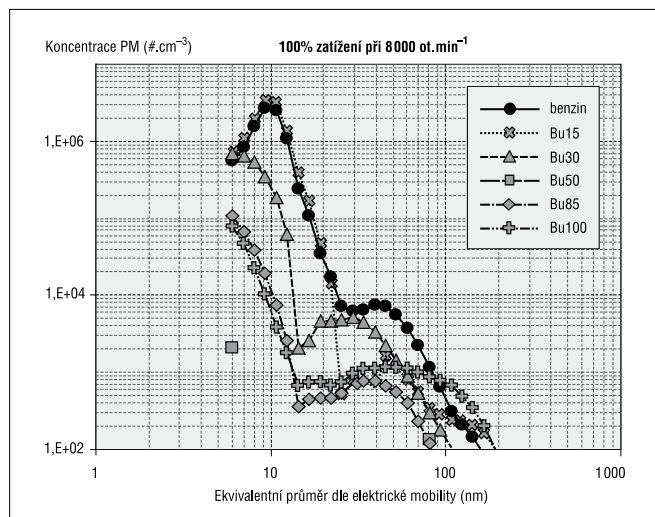


Obr. 3. Porovnání plynných emisí v neřaděných výfukových plynech při použití různých paliv v motoru bez úpravy karburátoru



Oba jevy lze vysvětlit ochuzením směsi, kdy klesá přebytek paliva, které nelze spálit, a spolu s tím narůstají teploty v průběhu spalování, které vedou k vyšší tvorbě oxidů dusíku. Tento jev je vyvolán nižší teoretickou spotřebou vzduchu snižující se s narůstajícím podílem n-buthanolu v palivu za předpokladu

Obr. 4. Porovnání velikostních spekter pevných částic pro různá paliva



nezměněné objemové dávky paliva díky shodnému průtoku nasávaného vzduchu karburátorem.

Obdobné závislosti byly pozorovány i při ostatních provozních režimech.

Dále byla sledována velikostní spektra pevných částic při vybraných provozních režimech. Typická změna v závislosti na použitém palivu je reprezentována na obr. 4. S nárůstem koncentrace n-buthanolu je patrný výrazný pokles produkce pevných částic jak v oblasti s vrcholem kolem 10 nm, tak v oblastech s vrcholem okolo 50–60 nm, a to jeden řád či více. Zde se setkává jednak vliv snížení obohacení směsi a jednak pokles přítomnosti vyšších uhlovodíků s narůstající koncentrací n-buthanolu.

Maximální dostupný točivý moment upraveného motoru

Obr. 5. zobrazuje zjištěné změny maximálního točivého momentu při vybraných otáčkách. Pro benzin je patrný velmi malý nárůst točivého momentu při velkých průměrech trysek. Rovněž pro n-buthanol jsou změny v točivém momentu zanedbatelné, jen při nejmenším průměru trysky je patrný menší pokles patrně z důvodu ochuzení směsi a tím i nižšího přívodu tepla.

Oproti tomu pro E85, kdy bylo možné motor provozovat až od průměru trysky 0,44 mm, bylo, díky značnému ochuzení směsi, dosahováno citelně nižšího točivého momentu.

U posledních dvou největších průměrů trysek točivý moment dosáhl svého maxima.

Celkově lze vliv na točivý moment shrnout mírným nárůstem točivého momentu pro obě alkoholová paliva při výběru vhodné trysky. Tento nárůst lze přičíst vlivu vyššího výparného tepla alkoholů, které ochlazuje plnicí vzduch a zvyšuje jeho hmotnostní množství dodané do válce. Vliv odlišné rychlosti hoření, která ovlivňuje účinnost tepelného oběhu, nebyl v rámci experimentů vyšetřován.

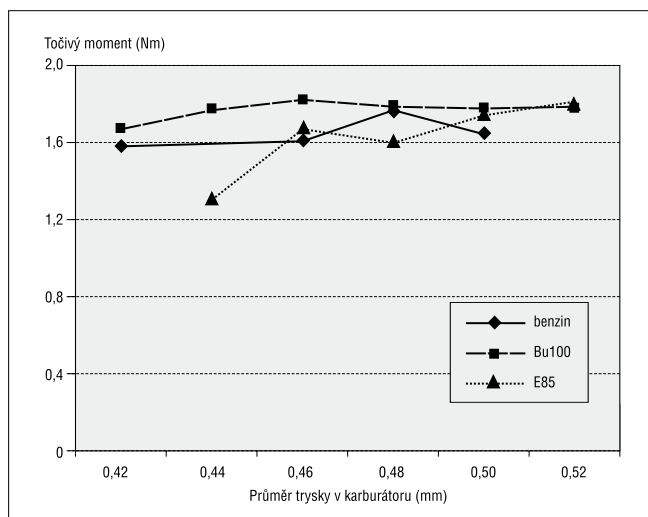
Plonné emise u motoru s upraveným karburátorem

Produkce znečišťujících látek pro jednotlivá paliva a trysky karburátoru u motoru s upraveným karburátorem je uvedena na obr. 6.

Teploty výfukových plynů upraveného motoru

Na obr. 7. jsou vykresleny závislosti teploty výfukových plynů pro jednotlivá paliva a použité průměry trysek karburátoru za plného zatížení a otáček 6000 ot.min⁻¹. Teploty výfukových plynů byly ve výchozím stavu (benzin, průměr trysky 0,42 mm) těsně nad úrovní 400 °C. Tato hodnota byla prakticky nejvyšší, byla překonána pouze při o něco vyšším průměru trysky pro benzin a při nejvyšších průměrech trysky pro E85. Tyto nárůsty

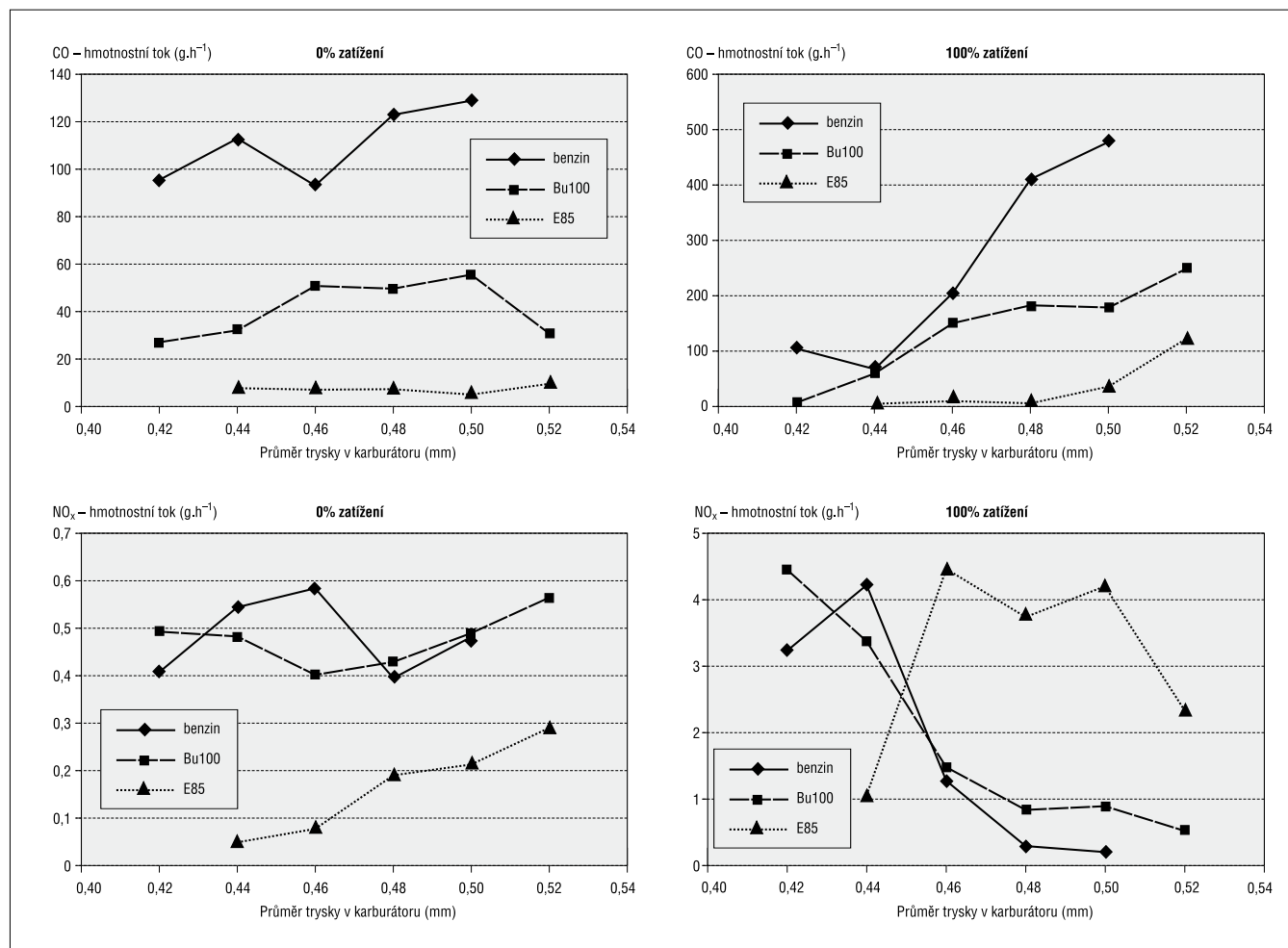
Obr. 5. Maximální točivý moment pro jednotlivá paliva a různé průměry trysek



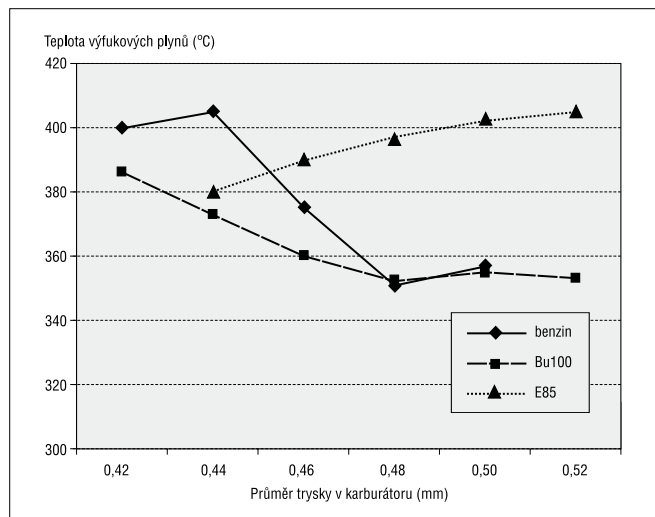
však byly naprosto zanedbatelné, v ostatních případech byly teploty výfukových plynů o něco nižší.

V případě ochuzování směsi lze nejprve při mírně chudě směsi očekávat nárůst teplot výfukových plynů oproti stechiometrickému složení. To lze vysvětlit stavem, kdy při stechiometrickém

Obr. 6. Produkce znečišťujících látek v pro jednotlivá paliva a trysky karburátoru



Obr. 7. Teploty výfukových plynů v závislosti na použitém palivu a průměru trysky



složení směsi dojde k nespálení části paliva, která snižuje množství uvolněného tepla a působí navíc jako inertní hmota navyšující tepelnou kapacitu látky ohřívané spalováním. Při mírném ochuzení dojde vlivem dostatku kyslíku k dokonalejšímu spálení paliva, nárůstu uvolněného tepla spolu s redukcí inertního nespáleného paliva a tím i nárůstu teploty výfukových plynů. Při výraznějším ochuzení lze pak očekávat převážení poklesu přivedeného tepla v palivu, které způsobí pokles teploty výfukových plynů.

Při obohacení však dochází k nárůstu množství látky, které není spáleno, a dochází k poklesu množství uvolněného tepla a množství inertního nespáleného paliva, které působí nárůst ohřívání hmoty.

Dalším vlivem, který působí změnu teploty výfukových plynů je průběh spalování. V případě rychlejšího průběhu hoření dojde při zjednodušené úvaze nejprve k přívodu tepla a pak k jeho ochlazení expanzí. Druhým případem je pomalé hoření, kdy je vliv následného ochlazení při expanzi nižší. Při rychlejším hoření a shodném množství uvolněného tepla je teplota výfukových plynů na konci expanze nižší oproti pomalejšímu hoření.

Z výše uvedeného lze usuzovat na nepříliš bohatou směs při použití benzínu za výchozího průměru trysky, která rychle přechází ve výrazně bohatou již pro trysku s průměrem 0,46 mm.

Pro n-buthanol jsou teploty výfukových plynů znatelně nižší pro menší průměry trysek a prakticky totožné pro vyšší průměry trysek. Na základě vlastností butanolu lze očekávat mírné ochuzení směsi a tím i nárůst teploty, nicméně výsledky ukazují prokazatelné ochlazení. Tento jev lze vysvětlit rychlejším průběhem hoření n-buthanolu a tím i větším ochlazením při expanzi.

Výrazně odlišná situace je při spalování E85. Zde lze předpokládat výrazné ochuzení pro trysky s průměry z dolního okraje spektra (pro průměr 0,42 mm nebylo možné vzhledem k ochuzení motor spolehlivě provozovat). Toto ochuzení je takové, že dochází k poklesu teploty výfukových plynů. Při snižování míry ochuzení lze očekávat nárůst teploty výfukových plynů na úroveň odpovídající benzínu či mírně vyšší. Je pravděpodobné, že při shodné bohatosti směsi se projeví pomalejší průběh hoření E85, který souvisí vyšším oktanovým číslem ethanolu, a tím dojde k nárůstu teploty výfukových plynů.

Při ostatních režimech při 6000 ot.min⁻¹ bylo dosahováno nižších teplot výfukových plynů (data nejsou prezentována). Z tohoto důvodu lze očekávat, že záměna paliva nepředstavuje příčinu vzniku problémů spojených s vyšším teplotním namáháním exponovaných dílů.

Z produkce oxidu uhličitého a plyných znečišťujících látek a provozních režimů motoru byla určena spotřeba paliva, a tím i účinnost motoru. Z výsledků není zřejmé, že použitím alkoholových paliv došlo k pozorovatelnému zhoršení celkové účinnosti motoru.

Působení alkoholů na vybrané díly motoru

Za účelem porovnání působení jednotlivých paliv na díly, u kterých lze předpokládat změny jejich vlastností důležitých pro správnou funkci, byly jejich vzorky vystaveny dlouhodobějšímu působení jednotlivých paliv. Vybrány byly zejména pryžové díly, kde lze očekávat změny tvrdosti či bobtnání, zejména vlivem působení alkoholových paliv. Působení byla vystavena membrána karburátoru, přírodní palivové hadičky a díl ruční pumpičky k napouštění karburátoru. Doba působení byla 16 dní při prostém ponoření u první sady vzorků a 40 hodin při ponoření v lázni se zrychlením působení pomocí ultrazvuku pro druhou sadu vzorků. Při působení obou alkoholových paliv (čistého butanolu i E85) bylo zaznamenáno značné zvýšení tvrdosti přírodních palivových hadiček, více patrné pro E85, které jsou zhotoveny z měkčeného PVC. To je pravděpodobně způsobeno vyplachováním rozpouštědel z materiálu hadiček. U ostatních vystavovaných dílů nedošlo k zaznamenaným změnám tvrdosti ani ke změně struktury povrchu při pozorování mikroskopem. Další změny, které by mohly ovlivnit funkci součástí nebyly zjištěny.

Závěr

Malý motor byl provozován na směs s vysokým obsahem butanolu. Došlo k nárůstu produkce oxidů dusíku a byl pozorován nárůst teploty výfukových plynů, proto lze očekávat zvýšené tepelné namáhání některých součástí motoru.

Jednoduchou úpravou karburátoru, spočívající v záměně trysky karburátoru za jinou, s větším průměrem, bylo docíleno obdobných či nižších teplot výfukových plynů a srovnatelné produkce znečišťujících látek za srovnatelných výkonových parametrů.

Poděkování: Práce byla podpořena ze zdrojů Studentské grantové soutěže „Možnosti použití vyšších alkoholů jako rychlé náhrady benzínu“ Fakulty strojní TU v Liberci a programem OPVK CZ.1.07/2.3.00/30.0034 „Podpora zkvalitnění týmů VaV a rozvoj intersektorální mobility“ na ČVUT v Praze.

Souhrn

V souvislosti s náhradou fosilních paliv jsou nečastěji zmiňovány motory pro vozidlové aplikace. Nemnoho prací se zabývá možnostmi a výsledky využití alternativních paliv, většinou na alkoholové bázi, v drobné mechanizaci, která využívá zpravidla zážehové motory. Předmětem práce je zjištění dopadů použití vybraných alkoholových paliv (n-buthanolu a E85) v malém zážehovém motoru bez úprav a s jednoduchou úpravou karburátoru. Při použití alkoholů bez

úpravy dochází s narůstajícím podílem alkoholu k ochuzování směsi prováděné poklesem točivého momentu, zúžení oblasti stabilního chodu motoru, nárůstem produkce oxidů dusíku a poklesu produkce oxidu uhelnatého a nespálených uhlovodíků. Jednoduchou úpravou karburátoru bylo docíleno potlačení těchto negativních vlivů, a tím i umožnění spalování vybraných alkoholových paliv.

Klíčová slova: zážehový motor, spalování, karburátor, alkoholy, n-butanol, ethanol.

Literatura

- CASCOONE, R.: Biobutanol: a replacement for bioethanol? *Chem. Eng. Prog.*, 104, 2008, s. S4–S9.
- PATAKOVÁ, P. ET AL.: *Perspectives of biobutanol production and use. Biofuel's engineering process technology*. Bernandes M.A.D.S., InTech, Rijeka, Croatia, 2011, s. 243–266, ISBN 978-953-307-480-1.
- CAIRNS, A. ET AL.: A Study of Alcohol Blended Fuels in an Un-throttled Single Cylinder Spark Ignition Engine. *SAE Technical Paper*, 2010-01-0618, 2010.
- THEWES, M. ET AL.: Analysis of the Effect of Bio-Fuels on the Combustion in a Downsized DI SI Engine. *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, 5, 2012 (1), s. 274–288.
- MEROLA, S. ET AL.: Optical Investigation of the Effect on the Combustion Process of Butanol-Gasoline Blend in a PFI SI Boosted Engine. *SAE Technical Paper*, 2011-24-0057, 2011.
- GU, X. ET AL.: Emission characteristics of a spark-ignition engine fuelled with gasoline-n-butanol blends in combination with EGR. *Fuel*, 93, 2012, s. 611–617.
- JONES, B.; MEAD, G.; STEEVENS, P.: *The Effects of E20 on Plastic Automotive Fuel System Components*. 2008, [online] <https://www.mda.state.mn.us/news/publications/renewable/ethanol/e20onplastics.pdf>.
- BAILEY, B.: Performance of Ethanol as a Transportation Fuel. In *Handbook on Bioethanol: Production and Utilization*. 1996, Edited by WYMAN, C. E., [online] <http://infohouse.p2ric.org/ref/36/35015.pdf>.
- BRESENHAM, D.; REISEL, J.: The Effect of High Ethanol Blends on Emissions from Small Utility Engines, *SAE Technical Paper*, 1999-01-3345, 1999, doi:10.4271/1999-01-3345.
- LI, L. ET AL.: Combustion and Emissions of Ethanol Fuel (E100) in a Small SI Engine, *SAE Technical Paper*, 2003-01-3262, 2003, doi:10.4271/2003-01-3262.
- LIU, T. ET AL.: The Feasibility Study of Low-Concentration Butanol as Fuel on Motorcycle, *SAE Technical Paper*, 2013-32-9134, 2013.
- BERTSCH, M. ET AL.: Influence of the Alcohol Type and Concentration in Alcohol-Blended Fuels on the Combustion and Emission of Small Two-Stroke SI Engines, *SAE Technical Paper*, 2012-32-0038, 2012, doi:10.4271/2012-32-0038.
- Rotary Throttle Valve Carburetor*. US Patent No. 7.114.708 B2, [on-line] <http://www.freepatentsonline.com/7114708.pdf>.
- VOJTÍŠEK-LOM, M.; COBB, J. T.: *On-road light-duty vehicle emission measurements using a novel inexpensive on-board portable system*. Presented at the 8th CRC On-road vehicle emissions workshop, San Diego, CA, April 20-22, 1998.
- VOJTÍŠEK-LOM, M. ET AL.: Off-cycle, real-world emissions of modern light-duty diesel vehicles. *SAE Technical Paper*, 2009-24-0148, 2009.

Pechout M., Trnka M., Novotný M., Vojtíšek M.: Adaptation of Small Spark Ignition Engine to Alcohol Fuels

Most of the effort to decrease dependency on fossil fuels is taking place in vehicular applications. There are relatively few studies aimed to investigate possibilities and results of usage of alternative, mainly alcohol-based, fuels in small engines used for propulsion of small garden machinery. The aim of this paper is to investigate the effects of alcohol fuels, n-butanol and E85, on the operation of small spark ignition engine without any modification and with simple carburetor modification. The test results of an unmodified engine show a remarkable mixture enleanment with increasing alcohol share accompanied by decrease in maximum torque, limitation of stable engine regimes, increased nitrogen oxides production and lowered production of carbon monoxide and hydrocarbons. Simple carburetor modification suppressed all the above mentioned negative impacts and thus allowed combustion of selected alcohol fuels.

Key words: gasoline engine, combustion, carburetor, alcohols, n-butanol, ethanol.

Kontaktní adresa – Contact address:

Ing. Martin Pechout, Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Studentská 2, 461 17 Liberec, Česká republika, e-mail: martin.pechout@tul.cz